

최신 레이저 절단기술

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 김환태
(htkimm@reseat.re.kr)

1. 개요

박강판에서부터 장대 산업용 중후강판의 절단에 이르기까지 고속, 고정밀, 저가격의 맞춤형 절단장치들이 출현하여 기술혁신이 빠른 속도로 진행되고 있다. 부가가치가 높은 고장력강, 스테인리스강, 알루미늄합금 등의 철강 또는 비철금속재료들을 용접하기 전에 절단작업을 할 때, 절단부의 품질과 특성은 용접이음부의 품질에 많은 영향을 미치기 때문에 소재의 종류와 판 두께에 따른 절단조건 선정 및 특성평가가 정밀하게 이루어진 상태에서 첨단기술의 개발이 필요하다.

고밀도 에너지를 열원으로 하는 레이저빔 에너지를 이용하여 금속재료를 절단하는 레이저빔 절단(Laser Beam Cutting) 기술은 플라즈마절단이나 산소·아세틸렌 가스절단에 비해 입열량이 적고 열변형을 최소화할 수 있으며, 레이저빔 절단부의 품질을 높이기 위해서는 모재와의 희석률을 최소화해야 하며 이를 위해서는 레이저 출력밀도, 레이저빔과 모재표면과의 반응시간의 적절한 조합, 절단가스의 공급량과 이송속도 등과 같은 공정조건을 최적으로 선정하는 것이 중요하다.

본 보고서는 자동차산업, 발전플랜트, 건축, 조선·해양산업 등 많은 산업분야의 생산 공정에서 핵심적으로 활용되고 있는 절단공정의 생산성 향상과 절단부의 우수한 품질 확보를 위한 절단공정의 효율화를 목적으로 고능력 레이저 절단기술의 개요와 특성 및 활용에 관하여 정리하였다.

2. 첨단 레이저절단의 최신기술

2-1. 레이저 절단기술의 발전

레이저 장치로는 최근 반도체 레이저가 괄목할만한 발전을 이루어 빔 품질이 재래의

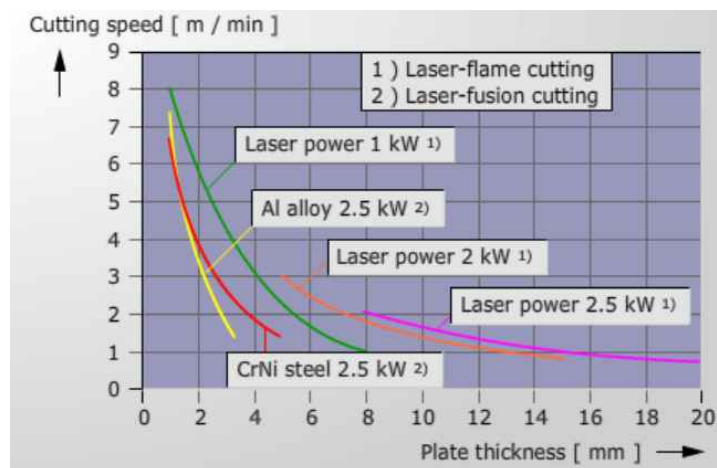
YAG레이저만큼 개선되고 일부의 장치는 전기-광변환율이 40% 이상으로 빔품질이 디스크레이저와 동등한 레벨 이상까지 향상된 것도 있다. 그래서 높은 레이저 파워밀도를 필요로 했던 레이저 절단분야 적용에도 검토될 정도로 개선 개량되고 있다.⁽¹⁾

레이저절단은 고품질, 고출력의 레이저가 필요하여 CO₂레이저가 일반적으로 사용되고 있다. 최근에는 박판의 경우에 고품질의 디스크레이저 또는 파이버레이저가 사용되어 CO₂레이저보다 고속절단이 가능하게 되었다. 또한 로봇을 이용하는 파이버절단에서는 절단 시 커브가 있어 감속이 있는 경우 로봇의 이동속도에 따라서 레이저의 입열을 제어하는 기술이 개발되어 있다.

디스크레이저나 파이버레이저를 이용하여 판 두께 약 10mm 정도까지의 철강재료를 절단하는 작업에서 CO₂레이저의 절단 품질과 동등한 것이 얻어지고 있어서 고휘도 고체 레이저의 적용이 증가할 것으로 예상된다. 그러나 판 두께 10mm 이상의 중후판 철강재료를 절단하는 경우에는 CO₂레이저 절단품질이 더 우수하다.

2-2. 레이저 절단성능

레이저 절단법의 형태와 금속재료의 종류에 대해서 레이저의 출력과 금속재료의 판 두께에 따른 레이저 절단속도를 <그림 1>에 정리하였다. 레이저 화염절단(laser flame cutting)법으로 구조용 강재를 절단하는 경우, 판 두께 5mm에서 2m/min의 절단속도를 얻기 위해서는 1kW의 레이저 출력이, 판 두께 7mm에서 2m/min의 절단속도를 얻기 위해서는 2kW의 레이저 출력이, 그리고 판 두께 8mm에서 2m/min의 절단속도를 얻기 위해서는 2.5kW의 레이저 출력이 각각 필요하다.⁽²⁾





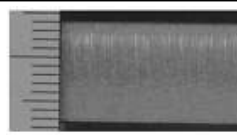
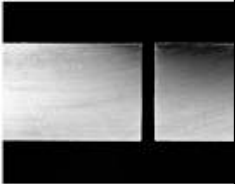
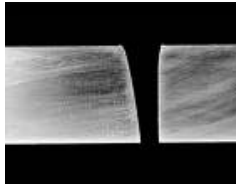
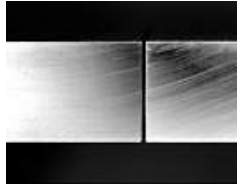
<그림 1> 금속소재의 판두께에 따른 레이저 절단속도의 크기⁽²⁾

한편 레이저 용융절단(laser fusion cutting)법으로 판 두께 4mm의 스테인리스강을 2m/min의 속도로 절단하거나 판 두께 3mm의 알루미늄합금을 2m/min의 속도로 절단하기 위해서는 각각 2.5kW의 레이저 출력이 필요하다.

2-3. 중 · 후판의 레이저 절단 성능

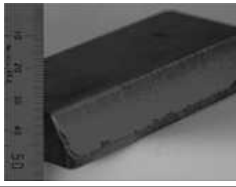


보조가스(assist gas)의 역할은 ① 용융된 재료를 드래그(drag)로부터 붙어서 날라 가게 하고, ② 비산하는 스팬터로부터 집광렌즈를 보호하며, ③ 산소를 사용하는 경우에는 산화반응 에너지를 이용한다. 일반적으로 연강의 절단에는 산소를, 스테인리스강의 절단에는 질소를 보조가스로 사용한다. 레이저절단에서 레이저 출력이 증가함에 따라 절단속도가 빠르게 되고 절단되는 판 두께도 두꺼워진다. 각종 열절단 방법에서 판 두께 12mm의 연강판을 절단할 경우 절단면의 품질을 <표 1>에 정리하였다.⁽³⁾ 레이저절단은 가스절단이나 플라즈마절단 방법에 비해 절단면에 미세한 조흔(streak)이 있으며 절단부의 폭(kerf)이 매우 작은 특징을 보인다.

<표 1> 연강판 열절단방법에 따른 절단품질 비교⁽³⁾

| | | 가스절단 | 플라즈마절단 | 레이저절단 |
|--------------------------------|---------|---|--|---|
| 절단면 (판 두께 12mm) | |  |  |  |
| 절단부의 폭(kerf) 형상 (판 두께 12mm) | |  |  |  |
| 절단 품질 | 면조도(Ry) | 50 μ m | 30 μ m | 30 μ m |
| | 드로스 부착 | 없음 | 없음 | 없음 |
| | 베벨 각도 | 1° | 1.5° 이하 | 0.6° 이하 |
| 절단부의 폭(kerf) | | 1.5mm | 3mm | 0.7mm |

레이저절단을 이용하여 연강과 스테인리스강 판재의 용접에 필요한 그루브(groove) 절단면의 가공 성능을 <표 2>에 정리하였다.⁽³⁾ 6kW의 레이저 출력으로 V 그루브 절단을 할 때 그루브 각도는 연강판의 경우에는 판 두께 15mm에서 45° 까지 절단할 수 있으며 스테인리스강 판재의 경우에는 판 두께 12mm에서 22.5° 까지 절단할 수 있다.

<표 2> 연강·스테인리스강의 레이저 그루브 절단면³⁾

| 재질 | 연강(SS41) | | 스테인리스강(STS304) |
|--------|---|--|---|
| 판 두께 | 16mm | 25mm | 12mm |
| 그루브 형상 | V 그루브, 30도 그루브 face 2mm | V 그루브, 30도 그루브 face 2mm | V 그루브, 22.5도 |
| 레이저 출력 | 6kW | | |
| 보조 가스 | 산소 | 질소 | 질소 |
| 절단면 |  |  |  |

3. 파이버레이저 절단기술

3-1. 파이버레이저의 절단특성⁴⁾

1970년대 초기에 레이저를 이용하는 CO₂레이저 가공기술이 등장한 이래 연속파(CW) 발진 고체 레이저가 개발되면서 램프 펌프형 ND:YAG 레이저가, 최근에는 확산 냉각형 CO₂레이저, 다이오드 펌프형 ND:YAG 레이저와 더불어 직접 다이오드 레이저(direct diode laser), 평판 원형 레이저(disk laser), 그리고 파이버레이저(fiber laser) 등이 개발되어 용접과 절단분야에서 폭넓게 사용되고 있다.⁴⁾

파이버레이저는 광섬유에 소량의 희토류를 첨가한 레이저 매체를 사용하는 고체 레이저이며 레이저 매체를 자극시켜 광자를 방출하는 소위 펌핑 작업을 위해 레이저 다이오드를 사용한다. 레이저 매체에 첨가하는 희토류 원소로는 Er(erbium), Yb(ytterbium), 그리고 Tm(thulium) 등이 있으며 Yb는 고출력 파이버레이저에 사용된다. 길고 얇은 형상을 갖는 파이버는 냉각효과가 우수하여 펌프 에너지에 의해 발생하는 열영향을 최소화시킬 수 있다.

미국 Massachuset주에 있는 IPG Photonics에서 제작한 파이버레이저는 고출력화가 용이하며 여기용 LD의 신뢰성이 높다. 현재 산업용으로는 300W급까지의 CW(연속 발진) 단일 모드 파이버레이저, 10kW급까지의 CW 멀티 모드방식 파이버레이저 등이 있는데 BBP(beam parameter product)가 17mm.mrad인 Yb-파이버레이저를 사용하여 판 두께 2mm와 4mm의 연강, 판 두께 0.8mm의 아연 도금 강판, 판 두께 3mm와 6mm의 오스테나이트계

스테인리스강, 그리고 판 두께가 5mm인 5000계열 알루미늄합금을 절단하였다.

3-2. 파이버 레이저 절단특성⁽⁵⁾

5kW 출력의 파이버레이저로 연강은 최대 판 두께 36mm, 스테인리스강 절단은 30mm까지 달성되고 있다. 파이버레이저 발전기를 탑재한 고속이동을 가능케 하는 중후판 절단기(FIBERTEC Z)의 경우 출력 2kW에서는 연강의 경우, 최대 절단두께 19mm까지이며 판 두께 3.2mm의 박판영역의 고속절단을 추가하였다.⁽⁵⁾ 스테인리스강에 대해서는 판 두께 2mm에서 8mm의 절단 능력을 갖고 있다. 한편 5kW 출력의 파이버레이저로 연강은 최대 판 두께 36mm, 스테인리스강 절단은 판 두께 30mm까지 달성되고 있다.

3-3. 파이버 레이저 절단특성⁽⁶⁾

파이버레이저는 CO₂레이저에 비해 재료에 대한 흡수율이 높고 투입 전력을 광으로 전환하는 효율이 높은 장점을 지니고 있어서 피어싱(piercing) 시간의 단축이나 박판 절단 속도의 향상, 운전비용의 저감 등이 가능하다. 2011년경에 파이버레이저를 중후판의 절단에 적용하기 위한 절단기가 제품화하여 10kW의 출력으로 판 두께 40mm의 연강재를 절단할 수 있는 파이버레이저 절단기가 발표되었다.⁽⁶⁾

최근 다음과 같은 특성을 지닌 파이버레이저 절단기들이 개발되어 시장에 소개되고 있다.

- (1) 절단기 본체의 높이를 낮게 하여 절단기 후방의 시계를 개선하고 구동장치를 강화함으로써 중후판의 절단작업에서 안정된 고속주행이 가능하도록 설계를 실시하고 있다.
- (2) 신형의 파이버레이저 절단기에서는 종래의 절단면의 도려냄이나 상부 표면과 하부 표면간의 폭의 변화를 작게 하는 등의 절단품질의 향상과 절단속도의 향상을 목표로 하여 광학 헤드를 개발하여 장착하였다.
- (3) 신형의 파이버레이저 절단기는 종래의 절단기를 소형화하고 절단기의 무게 중심을 좀 더 낮은 위치로 이동하는 동시에 구동계를 재검토함으로써 절단기의 이동속도를 종래의 24mm/min에서 60mm/min 정도로 고속화하였다.

- (4) 파이버레이저 절단기와 CO2레이저 절단기의 주요 차이점은 다음과 같다.
- 레이저 발진기를 탑재하지 않는다.
 - 차광 커버가 절단기 전체를 덮고 있다.
 - 발진기부터 절단 토치까지 광을 전송하기 위한 외부의 광로를 갖지 않는다.
 - 레이저 가스를 공급하는 장치가 불필요하다.

4. 레이저 절단 · 용접 복합장비

4-1. 레이저 절단 · 용접 복합장비 개요

용접과 절단을 동일한 장비에서 복합공정을 통해 절단과 용접을 실시하면 동일한 치구를 사용하여 동일한 경로를 따라 작업이 이루어지기 때문에 절단과 용접공정이 반복되는 경우에도 가공부위의 정밀성을 유지할 수 있으며 제품의 신뢰성을 높일 수 있게 된다. 따라서 연결식 로봇과 같이 중간 정도의 정확도를 갖는 장비인 경우에도 용접과 절단을 별도로 하는 것보다 더 높은 속도에서 작업할 수 있다.

고품질의 레이저빔, 최적화된 복합형 헤드, 그리고 모듈레이션 통제의 지원을 받는 3차원 용접 · 절단 복합장비의 특징들은 자동차분야의 B-pillar 복합공정에서 확인할 수 있다.⁽⁷⁾

제 1단계에서는 B-pillar의 내부에 여러 개의 구멍들을 가공한다.

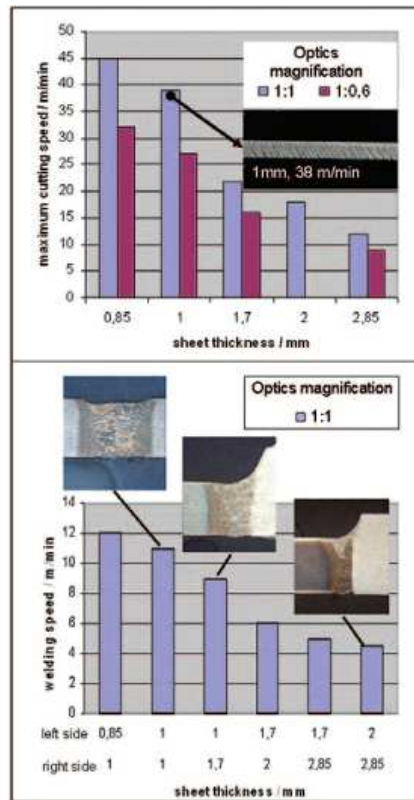
제 2단계에서는 최종 치수로 절단한다.

제 3단계에서는 pillar에 보강판재를 용접한다.

마지막 단계에서는 보강판재와 B-pillar를 관통하는 구멍을 가공한다.

4-2. 레이저 절단 · 용접 복합장비의 절단성능

레이저 절단법의 최대 절단속도(상부) 및 건전한 루트부 형상을 만들어 주는 최적의 절단속도 크기를 <그림 2>에 정리하였다.⁽⁷⁾ 이때 레이저의 출력은 4kW, 파이버의 직경은 150 μ m이며 절단 재료는 아연도금강판이다. 이를 보면 파이버의 직경을 작게 하여 레이저빔의 품질이 높아지면 빠른 레이저 절단속도를 얻을 수 있게 된다. 한편 매우 빠른 레이저 절단속도가 요구되지 않는 경우에는 레이저 출력을 낮추어서 절단비용을 저감할 수 있게 된다.



<그림 2> 최대 절단속도(상부) 및 건전한 루트부 형상을 만들어 주는 최적의 절단속도(하부)⁽⁷⁾

5. 펨토 초(femto second) 레이저 절단기술

최근 토목건축, 자동차, 항공우주 분야에 섬유강화 플라스틱(FRP: Fiber Reinforced Plastic), 탄소섬유강화 플라스틱(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic), PC(Poly Carbonate) 등의 복합재료들이 사용되면서 펨토 초 레이저 시스템을 이용하여 이 재료들을 절단하는 레이저 절단가공법이 주목을 받고 있다.⁽⁸⁾

미국의 Coherent inc.에서 제조한 펨토 초 레이저 장치를 사용하여 두께 0.5mm인 FRP, CFRP, PC 시료를 절단가공하였다. 이때 레이저는 X-Y축 방향으로 주사시켰고 Z축 상의 피치는 10~50 μ m로 하였으며, 주사속도 0.1~1.0mm, 레이저 출력 100~300mW로 변화시켜 가면서 절단한 결과 FRP는 16회, CFRP는 12회, PC는 10회째에 절단되었다.

펨토 초 레이저에 의한 FRP, CFRP, PC의 정밀 절단가공은 다른 절단법에 비하여 절단된 상단 면과 하단 면의 모서리 각도가 모두 90°에 가까운 양호한 값을 얻었으며 섬유 등의 구조체를 크게 손상하지 않고 절단면의 품질이 우수한 고정밀 절단가공이다.

6. 파이버레이저를 이용하는 수중절단

6-1. 레이저 수중절단 특성

수중에서 절단작업을 수행할 때 플라즈마절단은 절단속도가 빠른 반면에 절단폭이 넓고 드로스(dross)나 분진이 많이 발생한다. 이에 반해 레이저절단은 장비가 고가인 반면에 절단속도가 빠르고 절단폭도 좁아서 드로스나 분진의 발생량이 적은 특징을 갖는다.⁽⁹⁾

이중(double) 구조의 노즐을 이용하여 레이저 출력 10kW, 산소를 보조가스로 사용한 결과 대기분위기에서 판 두께 40mm의 STS304 스테인리스강을 450mm/min으로 절단할 수 있었으며 수중 분위기에서는 대기 분위기 절단용 이중 구조의 노즐의 바깥쪽에 가압수 커튼을 형성하는 물 노즐 부를 설정한 4중 구조의 노즐을 이용하여 판 두께 50mm의 STS304 스테인리스강을 50mm/min으로 절단할 수 있었다.

수중 분위기에서 파이버레이저를 이용하는 절단기술의 효율을 높이고 활용범위를 넓히기 위해서는 가공 헤드의 소형 경량화와 후관 절단기술의 향상이 필요하다. 한편 레이저 발전기의 대출력화에 의해 절단가능 판 두께가 증가하지만 전송 광학계나 집광 광학계에 대한 열부하나 가공 헤드의 설계상 제약과 내구성의 열화가 일어나지 않도록 대비하는 것이 중요하다. 이를 해결하기 위해 10~20kW 출력범위의 레이저 발전기를 이용한 가공 헤드와 노즐 구조의 최적화, 보조가스를 포함하는 가공조건의 최적화를 향한 기술개발이 요망된다.

6-2. TWI 레이저 수중절단 성능

영국의 TWI(The Welding Institute)는 C-Mn강과 STS304 스테인리스강을 대상으로 <표 3>의 절단조건을 사용하여 수중분위기에서 레이저 절단면의 품질을 다양하게 분석하였는데 이 결과들을 정리하면 다음과 같다.⁽¹⁰⁾

<표 3> 대기분위기, 수중분위기에서의 레이저 절단변수⁽¹⁰⁾

| 변수 | 수중분위기(underwater) | 대기분위기(in air) |
|-------------------|-------------------|---------------|
| 레이저 출력(kW) | 2, 3, 4, 5 | 5 |
| 콜리메일/렌즈 초점거리(mm) | 120/250 | 120/250 |
| 초점 위치(mm) | 0, 15 | 0, 15 |
| 스텐드-오프 간격(SD)(mm) | 15 | 15 |
| 절단가스 압력(bar) | 2, 4, 6, 8 | 2, 4, 6, 8 |
| 절단속도(mm/min) | 50~2200 | 400~2000 |
| 판 두께(mm) | 6, 12, 32 | 6, 12 |

- (1) 수중분위기에서 C-Mn강과 STS304 스테인리스강의 레이저 절단면에 나타난 드로스의 높이는 C-Mn강이 STS304 스테인리스강에 비해 크게 발생하였다.
- (2) 수중분위기에서 레이저 절단면에 발생하는 드로스의 높이는 절단소재의 판 두께와 레이저 출력이 증가함에 따라 크게 발생하였으며 레이저 절단속도가 감소함에 따라 작게 발생하였다.
- (3) 수중분위기에서 C-Mn강과 STS304 스테인리스강을 레이저 절단할 때 나타나는 질량의 감소(mass reduction)는 대기분위기에서 레이저 절단할 때 나타나는 질량의 감소에 비해 매우 낮은 수준을 보였다.

<참고문헌>

1. KATAYAMA Seiji, “레이저加工的現狀と展開”, 「溶接技術(日本)」, 64(5), 2016, pp.52~57
2. IAB-International AUTHORISATION BOARD, “Cutting and other edge preparation processes“, International Institute of Welding Documents, 2016, pp.1~15
3. 長堀正幸, 沼田慎治, 佐野義美, “中·厚板レーザー切斷の最新技術”, 「溶接學會誌(日本)」, 79(2), 2010, pp.136~145
4. G. Verhaeghe, “The Fiber Laser — A Newcomer for Material Welding and Cutting“, Welding Journal, 84(8), 2005, pp.56~60
5. 坂井 大司, “各種切斷装置の開發と特徴”, 「溶接技術(日本)」, 63(9), 2015, pp.43~47
6. 石井辛二, 沼田慎治, “中厚板切斷分野のファイバーレーザー切斷機”, 「溶接技術(日本)」, 63(9), 2015, pp.48~53
7. Dirk Petring and Frank Schneider, “One Machine Does It All for Laser Beam Welding and Cutting“, Welding Journal, Vol. 88, NO. 3 (2009), pp.38~41
8. 3. 園家啓嗣, 石田和義, “フェムト秒レーザーによる炭素系複合材料の精密切斷加工”, 「表面技術(日本)」, 64(2), 2013, pp.127~132
9. 峰原英介, “ファイバーレーザーによる水中切斷技術”, 「配管技術(日本)」, 54(6), 2012, pp.36~40
10. Ali Khan and Paul Hilton, “Optimisation of Underwater Laser Cutting for DecommissioningPurposes“, ICALEO 2014 Proceeding, Paper Number #102

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.